



Verena Schallhart; Michael Hohensinner; Thomas Steiner; Lukas Möltner

# Modellbasierte Untersuchungen zum Wärmehaushalt von Fahrzeugkatalysatoren in Stadtbussen unter besonderer Berücksichtigung ortstypischer Fahrprofile

116 – Energy, Environment & Transportation

## Abstract

Die in Abgasnachbehandlungsanlagen implementierten Katalysatoren können erst nach Erreichen einer bestimmten Mindesttemperatur, der light-off Temperatur, Schadstoffemissionen effizient umsetzen und somit dazu beitragen, die Abgasnormen zu erfüllen. Die light-off Temperatur wird je nach Fahrprofil erst nach einigen Minuten Fahrzeit erreicht und kann bei bestimmten Fahrzyklen selbst nach längerer Zeit wieder unter die erforderliche Mindesttemperatur sinken. Ziel dieser Forschungsaktivität ist die Simulation des Temperaturverlaufs über die gesamte Abgasnachbehandlungsanlage während zwei realer Fahrzyklen von Stadtbussen mittels eines experimentell validierten numerischen Modells und die Untersuchung des Potenzials der Start-Stopp-Betriebsweise auf den Thermohaushalt der Katalysatoren. Das Berechnungsmodell greift für die Simulation auf experimentell ermittelte Kennfelder zurück, welche das spezifische Verhalten des Motors beschreiben. Zusätzlich wurden zwei Fahrprofile, einerseits repräsentativ für den regulären Stadtverkehr und andererseits eine regionaltypische Linie mit großem Mittelgebirgsanteil, mittels GPS-Datenlogger aufgezeichnet und als Eingangsparameter für das Modell verwendet. Mithilfe des entwickelten Berechnungsmodells konnte der Temperaturverlauf über die gesamte Abgasnachbehandlungsanlage während der stark instationären Betriebsbedingungen mit und ohne Start-Stopp-System beschrieben und bewertet werden. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse ließen sich Handlungsempfehlungen für die spezifischen Fahrprofile ableiten.

## Keywords:

Abgasnachbehandlung, Dieselmotor, Katalyse, light-off Temperatur, SCR, Start-Stopp

## Einleitung

Der Dieselmotor weist in Kombination mit modernen Auflade- und Einspritzsystemen eine gute Drehmomentcharakteristik über einen weiten Drehzahlbereich auf. Der dadurch vergleichsweise hohe thermodynamische Wirkungsgrad gekoppelt mit der Zuverlässigkeit und Langlebigkeit des Dieselmotors macht diesen besonders für den Einsatz in Nutzfahrzeugen attraktiv.

Die Einführung eines Abgastests zur Feststellung der Emissionen im realen Fahrbetrieb (engl. real driving emissions RDE) als Ergänzung zu den herkömmlichen Prüfstandszyklen mit der 2017 in Kraft tretenden Abgasgesetzgebung EURO 6d fordert zukünftig die Funktionalität der Abgasnachbehandlung über den gesamten Kennfeldbereich zu jedem Zeitpunkt, auch unter erweiterten, kundennahen Bedingungen (Brück et al. 2017, Kern et al. 2014, Badur et al. 2016). Diese zunehmend strenger werdenden Emissionsgesetzgebungen weltweit, stellen jedoch eine große Herausforderung für die Entwicklung und den Betrieb von Dieselmotoren dar. Für den zukünftigen Erfolg des Dieselmotors ist die drastische Reduktion von Emissionen, insbesondere Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) oder Partikelmasse (PM), unter Beibehaltung von Vorzügen wie Fahrdynamik und Kraftstoffverbrauch erforderlich (Merker 2006).

Die steigenden Anforderungen können nur durch eine optimale Kombination aus innermotorischer Verbrennung und Abgasnachbehandlung erfüllt werden. Abbildung 1 zeigt einen typischen Aufbau einer, der EURO 6 Abgasgesetzgebung entsprechenden, Abgasnachbehandlungsanlage für Dieselmotoren. Das System zur Schadstoffreduktion besteht aus einem Dieseloxydationskatalysator (DOC), zur Oxidation von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenmonoxid (CO), einem Dieselpartikelfilter (DPF), zur Abscheidung der Partikelmasse, und einem System zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) von  $\text{NO}_x$ , bestehend aus einer Mischstrecke und einem Katalysator.

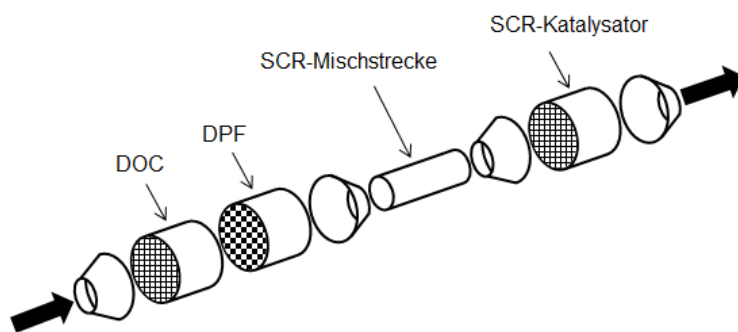


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer typischen Abgasnachbehandlungsanlage für EURO 6 Stadtbusse und Nutzfahrzeuge

### Problemstellung und Zielsetzung

Die im Abgasnachbehandlungssystem implementierten Katalysatoren benötigen eine bestimmte Mindesttemperatur, um Schadstoffe effizient umzusetzen. Das Erreichen dieser sogenannten light-off Temperatur von ungefähr 473 K kann vor allem für SCR-Systeme die, wie in Abbildung 1 dargestellt, sehr weit vom Motor entfernt installiert sind, nach Start des Motors sehr lange in Anspruch nehmen. Während dieser Phase wird ein Großteil der bei der Verbrennung entstandenen Emissionen unbehandelt in die Atmosphäre ausgestoßen. Eine weitere Schwierigkeit stellt das Halten der light-off Temperatur während des Betriebs dar (Laible et al. 2015, Goebel et al. 2008).

Als besondere Herausforderung gilt dabei die katalytische Gasreinigung von Stadtbusen. Aufgrund ihres speziellen Fahrprofils mit einem Lastkollektiv, das sehr viele Betriebspunkte mit geringer Leistung inkludiert, werden das Erreichen und das Halten der Katalysatortemperatur nochmals erschwert. Die Tatsache, dass im urbanen öffentlichen Verkehr die Distanzen zwischen einzelnen Haltepunkten (Haltestellen oder auch Ampelstopps) mitunter sehr kurz sein können, verschärft diese Problematik zusätzlich. Während dieser periodisch auftretenden Stopps kühlt das Leerlaufabgas mit einer relativ geringen Temperatur das Abgasnachbehandlungssystem aus. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Geschwindigkeitsprofil mit der dazugehörigen Temperatur des SCR-Katalysators und der light-off Temperatur. Dabei ist deutlich die lange Dauer bis zum Erreichen der light-off Temperatur nach Motorstart ① und das

wiederholte Absinken der Temperatur unter light-off ② aufgrund von längeren Stopps zu erkennen (Goebel et al. 2008, Möltner et al. 2016).

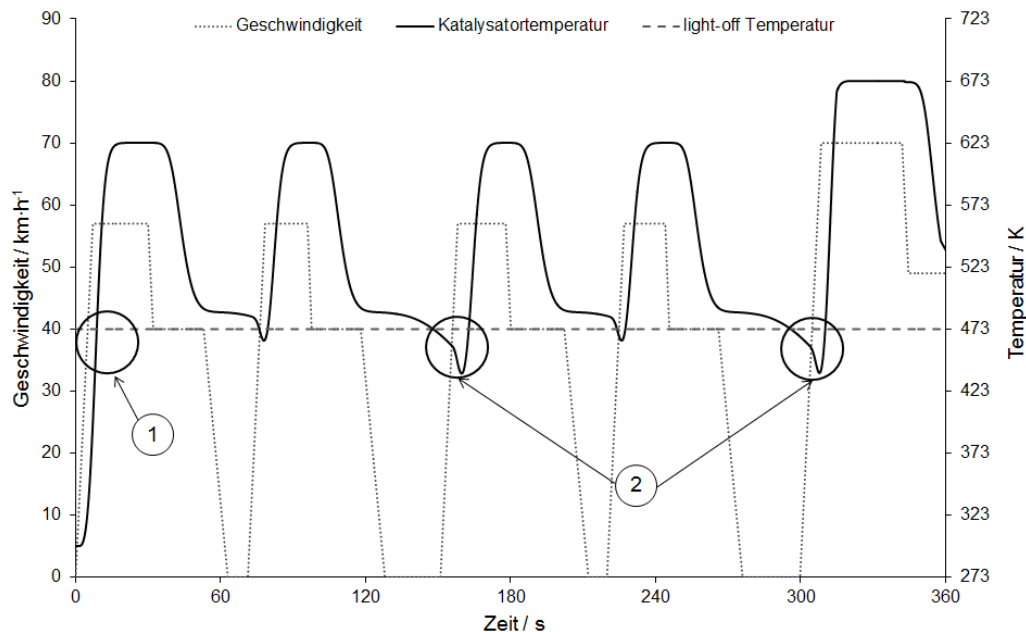


Abbildung 2: Temperaturverlauf für einen SCR-Katalysator mit dazugehörigem Geschwindigkeitsprofil; ① Erreichen der light-off Temperatur, ② Absinken der Temperatur unter light-off (Möltner et al. 2016)

Für die Optimierung der katalytischen Umsetzungen bei geringen Temperaturen stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, zum Beispiel niedertemperaturaktive katalytische Beschichtungen oder innermotorische Maßnahmen, welche eine Erhöhung der Abgastemperatur verursachen und somit die Systeme zur Schadstoffreduktion schneller aufheizen können. Innermotorische Maßnahmen sind jedoch mit einem Kraftstoffmehrverbrauch verbunden, welcher sich wiederum negativ auf die immer strenger regulierten Kohlendioxidemissionen (CO<sub>2</sub>) auswirkt. Der Start-Stopp-Betrieb zeigt ebenfalls einen Einfluss auf die Temperatur der Abgasnachbehandlungs-anlage auf und hat zusätzlich das Potenzial von deutlichen Kraftstoffeinsparungen durch das Abstellen des Motors während Stillständen, beispielsweise bei Ampelstopps oder im Fall von Bussen an Haltestellen (Rampeltshammer et al. 2005).

Ziel dieser Forschungsaktivität ist die Untersuchung des Potenzials von Start-Stopp-Systemen auf das Ansprungsverhalten von Katalysatoren und das Beibehalten der light-off Temperatur während des Betriebs von Stadtbussen mittels numerischer Simulation. Das entwickelte Berechnungsmodell bietet die Möglichkeit, den Temperaturverlauf über die gesamte Abgasnachbehandlungsanlage während real auftretenden Fahrzuständen mit und ohne Start-Stopp-System zu beschreiben und zu bewerten. Dadurch können spezifisch für das Fahrprofil der einzelnen Buslinien Maßnahmen für ein besseres Thermomanagement analysiert werden. Im Detail sollen eine Linie, welche repräsentativ für den regulären Stadtverkehr ist mit einem relativ moderatem Höhenprofil, mit einer Linie mit großem Mittelgebirgsanteil auf ihr Temperaturverhalten, mit und ohne Start-Stopp-Betriebsweise verglichen werden.

## Methodik

Die Simulation des Temperaturverlaufs der Abgasnachbehandlungsanlage während unterschiedlicher realer Fahrzyklen von Stadtbussen erfolgte mittels eines experimentell validierten numerischen Modells. Die Eingangsdaten für das Berechnungsmodell, wie beispielsweise Abgaszusammensetzung und –temperatur, wurden am Motorprüfstand generiert. Des Weiteren wurden die Fahrprofile aller Buslinien der Innsbrucker Verkehrsbetriebe mittels GPS-Datenlogger aufgenommen. Anhand der ermittelten Daten konnte die Temperatur der Abgasnachbehandlungsanlage zu jedem Zeitpunkt berechnet und somit der Einfluss einer Start-Stopp-Funktion auf das Erreichen und Halten der light-off Temperatur analysiert werden. Abbildung 3 stellt den forschungslogischen Ablauf der Untersuchungen dar.

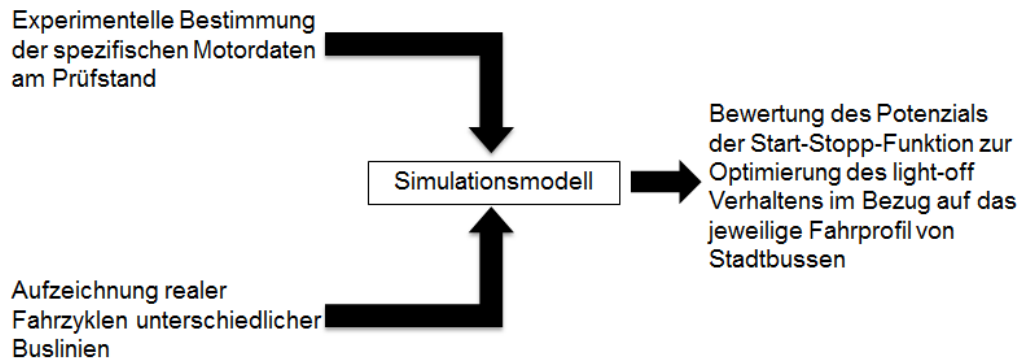


Abbildung 3: Forschungslogischer Ablauf der durchgeführten Untersuchungen

## Experimentelle Untersuchungen

### Motorkenndaten

In einem ersten Schritt wurden die Kenndaten eines typischen EURO 6 Motors, welcher in Bussen eingesetzt wird, am Motorprüfstand untersucht. Der Versuchsaufbau setzte sich aus der Verbrennungskraftmaschine, der Leistungsbremse, der Prüfstandssteuerung und unterschiedlichen Messsystemen zusammen. In Tabelle 1 sind die wesentlichen technischen Daten des Versuchsmotors zusammengefasst.

Hersteller / Typ	MAN / 2066 LUH50
Motorbauart	6 Zylinder Reihenmotor
Hubraum	10,5 l
Nennleistung	206 kW bei 1900 min <sup>-1</sup>
Maximales Drehmoment	1350 Nm bei 1000 min <sup>-1</sup> bis zu 1400 min <sup>-1</sup>
Emissionsstandard	EURO 6

Tabelle 1: Technische Daten des Versuchsmotors

Die Untersuchungen am Motorprüfstand deckten mehrere Teillast und Vollast Betriebspunkte ab, um eine möglichst breite Spanne des Motorkennfelds abbilden zu können. In Abbildung 4 ist die Position der gewählten Betriebspunkte im Motorkennfeld dargestellt.

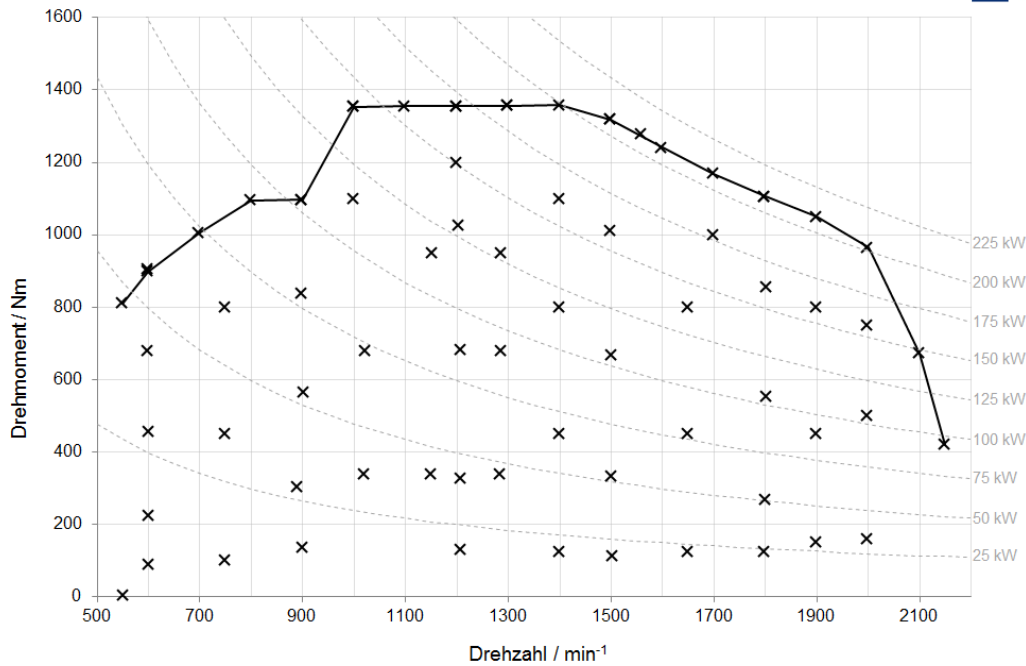


Abbildung 4: Position der untersuchten Betriebspunkte im Motorkennfeld

Anhand der beschriebenen Versuche am Motorprüfstand konnte ein Teil der nötigen Eingangsparameter für das Simulationsmodell generiert werden, wobei der Abgasmassenstrom und der Temperaturverlauf über die gesamte Abgasmachbehandlungsanlage die wichtigsten Parameter darstellten. Die Motordaten wurden mittels National Instruments LabView und ETAS INCA aufgezeichnet. Zusätzlich zu den aus dem Motorsteuergerät erhaltenen Daten, wurde der Massenstrom der Ansaugluft mittels eines thermischen Durchflussmessers und der Kraftstoffverbrauch anhand eines Messsystems basierend auf dem Coriolis Prinzip bestimmt. Abbildung 5 zeigt die aus den beschriebenen Untersuchungen generierten Kennfelder der Abgastemperatur (links) und des Abgasmassenstroms (rechts) basierend auf einer linearen Interpolation zwischen den untersuchten Betriebspunkten.

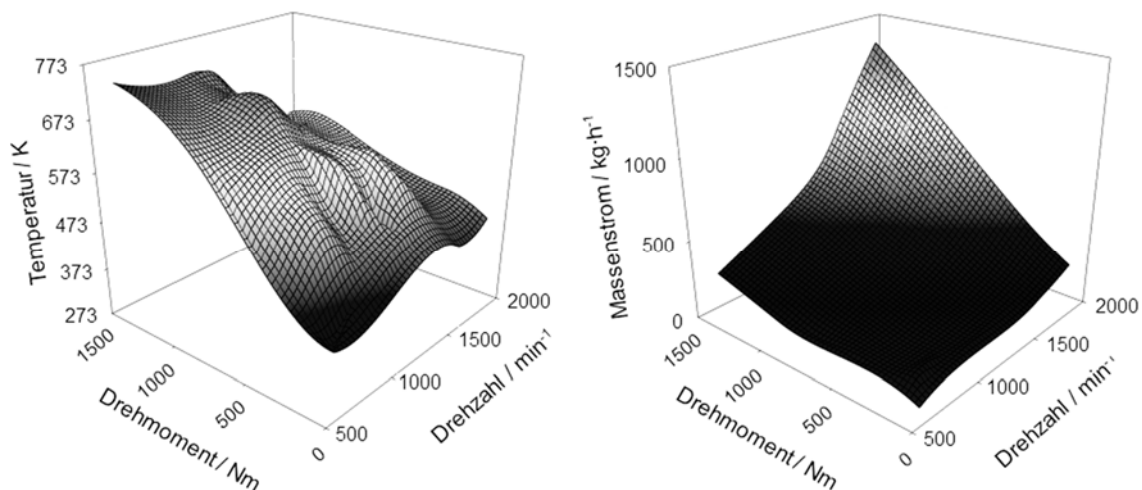


Abbildung 5: Kennfelder der Abgastemperatur (links) und des Abgasmassenstroms (rechts) am Eintritt der Abgasmachbehandlungsanlage basierend auf einer Interpolation zwischen den Betriebspunkten

## Aufzeichnung realer Fahrzyklen

In Ergänzung zu den Untersuchungen am Motorprüfstand wurden reale Fahrprofile von Stadtbussen aufgezeichnet und bewertet. Für diesen Zweck wurden Gelenksbusse der Innsbrucker Verkehrsbetriebe mit GPS-Datenlogger ausgestattet, um somit das Geschwindigkeits- und Höhenprofil aller Buslinien zu ermitteln. Die Datenaufzeichnungen starteten jeweils an einer Endhaltestelle und wurden bis zum wiederholten Erreichen derselben Endhaltestelle durchgeführt, wodurch sich mitunter längere Standzeiten an der entgegengesetzten Endhaltestelle ergaben. Die Testfahrten wurden werktags zwischen 16:00 und 18:00 Uhr durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen.

Anhand von den ermittelten Geschwindigkeitsprofilen konnten, unter Berücksichtigung des Luft- und Rollwiderstands, die Beschleunigungs- und Leistungsanforderungen der Busse bestimmt werden. Des Weiteren wurde eine Grundlast von 20 kW, für Klimaanlage und andere Zusatzeinrichtungen, addiert. Mithilfe der erhaltenen Daten konnten der jeweilige Betriebspunkt aus dem Motorkennfeld (Abbildung 4) und dadurch die Eingangsparameter für das numerische Berechnungsmodell ermittelt werden.

## Modellierung

Das Ziel der Modellierung ist den Temperaturverlauf über die Abgasnachbehandlungsanlage unter Berücksichtigung der Auswirkung sich ändernder Betriebszustände abzubilden. Für diese Berechnungen wurde das in (Möltner et al. 2016) beschriebene Simulationsmodell angewandt. Die Lösung der einzelnen Differenzialgleichungen erfolgt in diesem Modell numerisch nach Euler. Das Berechnungsmodell wurde mit experimentellen Daten abgeglichen und konnte somit validiert werden.

Die Wärmetransportvorgänge in der Abgasanlage werden mittels zwei parallel laufenden 1D-Simulationen berechnet. Einerseits werden Temperaturänderungen in den Rohren beziehungsweise Katalysatoren betrachtet, andererseits die dadurch hervorgerufene Temperaturänderung des Abgases. Die Abgasanlage wird zur Simulation des Temperaturverlaufs in eine Vielzahl von gleich verteilten Zellen gegliedert, die Zellgröße und der Zeitintervall werden dabei so definiert, dass eine weitere Reduktion beider Größen keinen weiteren Einfluss mehr auf das Ergebnis hat. Die Wärmetransportvorgänge in einem einzelnen Element der Abgasnachbehandlungsanlage sind schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

Die Temperaturänderung des Abgases wird über die in einer Zelle emittierten beziehungsweise absorbierten Wärmemenge aufgrund erzwungener Konvektion zwischen dem Abgas und der Abgasnachbehandlungsanlage bestimmt, Gleichung (1).

$$\frac{dQ}{dt} = m_{Gas} \cdot c_{p_{Gas}} \cdot \frac{dT}{dt} = \pm \dot{Q}_{konv\ 1} \quad (1)$$

Die Wärmebilanz über ein Element der Abgasanlage setzt sich aus dem konduktiven Wärmeübergang in der Komponente selbst, den konvektiven Wärmetransportvorgängen zwischen dem Abgas und dem Abgasnachbehandlungssystem und den konvektiven Wärmeverlusten an die Umgebung zusammen, Gleichung (2).

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= m_{Zelle} \cdot c_{p_{Zelle}} \cdot \frac{dT}{dt} = \dots & (2) \\ &= \pm \dot{Q}_{kond\ ein\ 1} \pm \dot{Q}_{konv\ 1} \pm \dot{Q}_{kond\ aus\ 1} - \dot{Q}_{Verluste\ 1} \end{aligned}$$

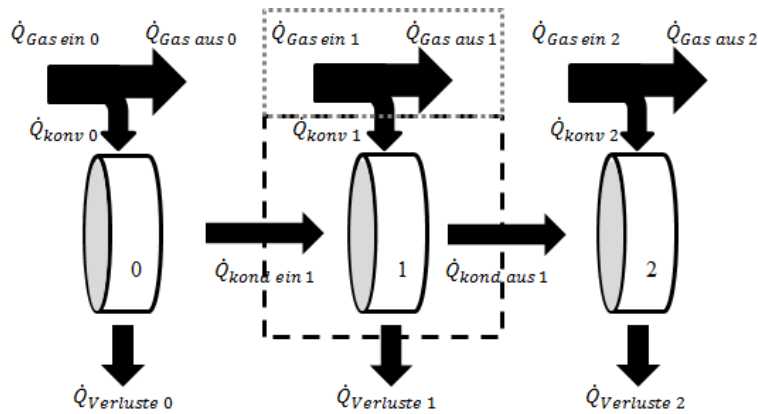


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wärmetransportvorgänge in einer einzelnen Zelle der Abgasnachbehandlungsanlage, Zelle 0: Eingang, Zelle 2: Ausgang

Des Weiteren wird der Druckverlust über die Rohrleitungen und die Katalysatoren beziehungsweise den Partikelfilter berücksichtigt. Die einzelnen Komponenten wurden mit einer Luftspaltisolierung modelliert. Die Dimensionen der modellierten Abgasnachbehandlungsanlage sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. Der Aufbau der Anlage entspricht dabei dem in Abbildung 1 dargestellten System.

	Motor zu DOC	SCR-Misch- streckee
Material	1.4301	1.4301
Länge	580	500 mm
Rohrdurchmesser innen	98	98 mm
Rohrdurchmesser außen	108	108 mm

Tabelle 2: Abmessungen der modellierten Rohrleitungen

	DOC	DPF	SCR
Material	Cordierit	Cordierit	Cordierit
Länge	203	305	254 mm
Durchmesser	267	267	267 mm
Zelldichte	200	200	400 cpsi
Wandstärke	294	294	98 $\mu$ m
Isolierung	5	5	5 mm

Tabelle 3: Kenndaten der für die Simulation verwendeten Katalysatoren und des DPFs

## Diskussion der Ergebnisse

Aus den aufgezeichneten Fahrzyklen wurden eine Buslinie repräsentativ für den regulären Stadtverkehr (RSV), mit einem relativ moderaten Höhenprofil, und eine Linie mit großem Mittelgebirgsanteil (MGV) ausgewählt. Diese sollen nachfolgend auf das Temperaturverhalten der Abgasnachbehandlungsanlage während des Betriebs verglichen werden. Des Weiteren soll das Potenzial des Start-Stopp-Betriebs auf das Ansprungsverhalten der Katalysatoren und das Beibehalten der light-off Temperatur für die spezifischen Fahrprofile dieser beiden Linien bewertet werden.

## Fahrzyklen

In [Tabelle 4](#) sind die wichtigsten Kenndaten der beiden betrachteten Fahrprofile (RSV und MGV) zusammengefasst. Die Charakterisierung erfolgt anhand von der Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}_{av}$ , der durchschnittlichen Geschwindigkeit ohne Standzeit in der Endhaltestelle  $\bar{v}_{stop}$ , der maximalen Geschwindigkeit  $v_{max}$  und der zurückgelegten Distanz von einer Endhaltestelle bis zum wiederholten Erreichen derselben Endhaltestelle. Dabei ist zu erkennen, dass die Buslinie mit einem großen Mittelgebirgsanteil eine deutlich höhere Durchschnittsgeschwindigkeit im Vergleich zu dem RSV-Zyklus aufweist. Die erhöhte Geschwindigkeit des MGV ist auf den geringeren innerstädtischen Anteil, mit vermehrten Ampel- und verkehrsbedingten Stopps, zurückzuführen. Des Weiteren ist für den MGV-Zyklus kein Unterschied zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit und der durchschnittlichen Geschwindigkeit ohne Standzeit in der Endhaltestelle zu erkennen, zumal für diesen Fahrzyklus keine Stillstandzeiten in einer Endhaltestelle während eines Umlaufs vorgesehen sind.

	RSV	MGV	
$\bar{v}_{av}$	17,7	27,1	km·h <sup>-1</sup>
$\bar{v}_{stop}$	19,3	27,2	km·h <sup>-1</sup>
$v_{max}$	57,3	69,4	km·h <sup>-1</sup>
Distanz	23,3	25,5	km

Tabelle 4: Kenndaten der beiden Fahrprofile RSV und MGV

## Höhen- und Geschwindigkeitsprofile

[Abbildung 7](#) und [Abbildung 8](#) zeigen die mittels GPS-Datenlogger aufgezeichneten Höhen- und Geschwindigkeitsprofile der beiden Fahrzyklen RSV und MGV. Die für den RSV repräsentative Buslinie zeigt während einer Fahrt eine maximale Änderung von 50 Höhenmetern auf, während die Linie mit einem großen Mittelgebirgsanteil Bergauf- und Abfahrten von 300 Höhenmetern inkludiert. Des Weiteren sind am MGV-Geschwindigkeitsprofil die fehlenden Stillstandzeiten in einer zusätzlichen Endhaltestelle, sowie am RSV-Geschwindigkeitsprofil die vergleichsweise häufigen Stillstandzeiten aufgrund des höheren innerstädtischen Anteils zu erkennen. Diese Standzeiten, verursacht durch Haltestellen- oder verkehrsbedingte Stopps, wirken sich generell negativ auf die Katalysator-temperatur aus, da in diesen Zeitspannen, ohne Start-Stopp-Funktion, verhältnismäßig kühles Abgas die Abgasanlage durchströmt. Jedoch können sich die, vor allem im innerstädtischen Bereich entstehenden, häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit wiederholt auftretenden hohen Lastpunkten positiv auf die Abgastemperatur auswirken.



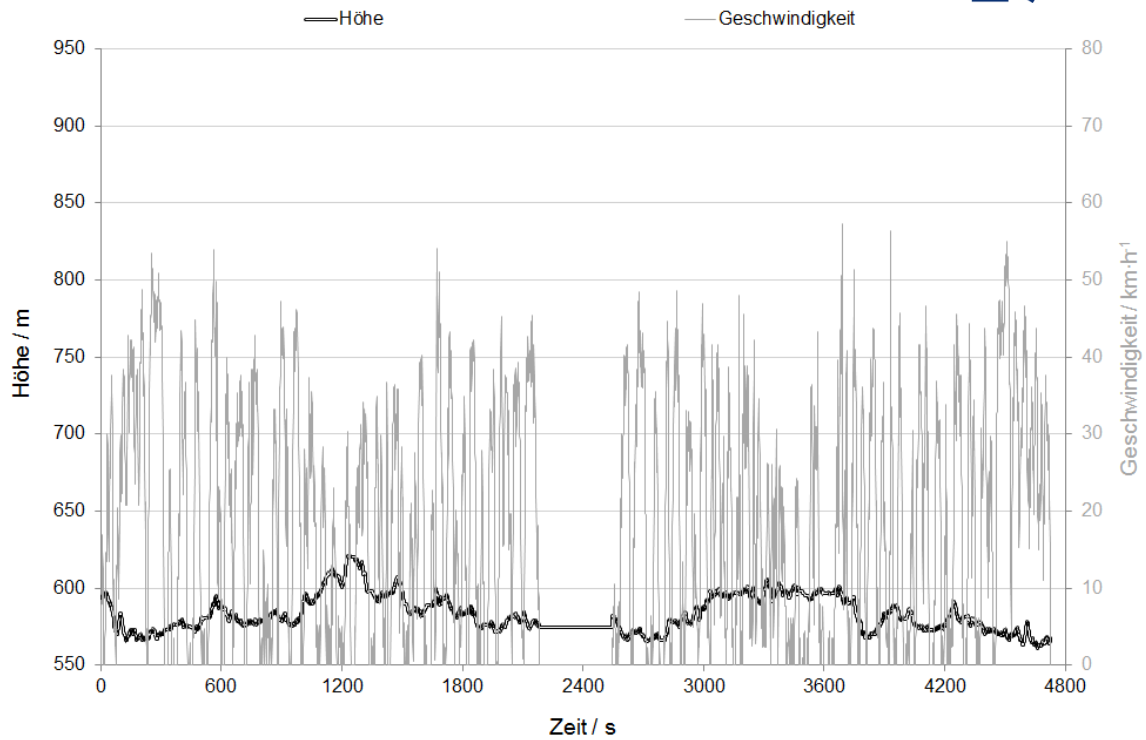


Abbildung 7: Aufgezeichnetes Höhen- (schwarz) und Geschwindigkeitsprofil (grau) für den RSV-Fahrzyklus

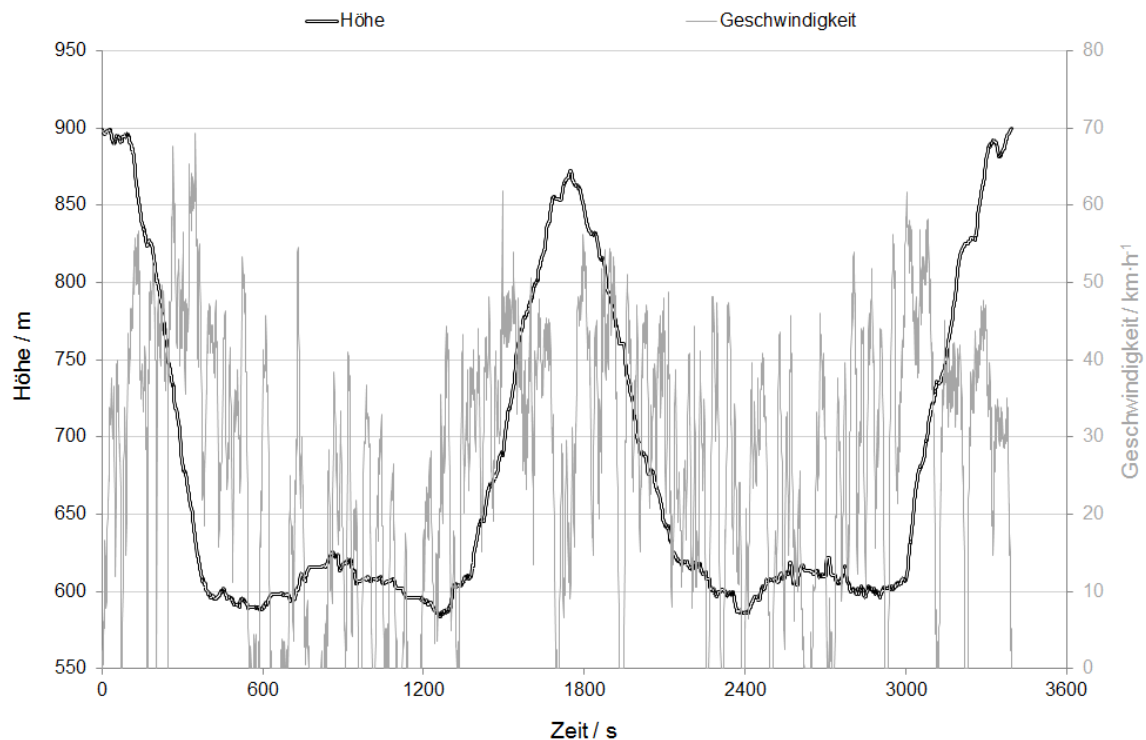


Abbildung 8: Aufgezeichnetes Höhen- (schwarz) und Geschwindigkeitsprofil (grau) für den MGV-Fahrzyklus

## Thermohaushalt mit und ohne Start-Stopp-Funktion

Der Temperaturverlauf über die Abgasnachbehandlungsanlage ist von dem Wärmeaustausch mit dem einströmenden Abgas und den Wärmeverlusten an die Umgebung abhängig. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Temperaturänderungen des SCR-Katalysators für die beiden betrachteten Fahrzyklen RSV und MGV, mit beziehungsweise ohne Start-Stopp-Betriebsweise. Zum besseren Verständnis ist die abgebildete Katalysatortemperatur als Mittelwert für den gesamten Katalysator und das dazugehörige Höhenprofil dargestellt. Die Betrachtung des Temperaturverlaufs erfolgt für zwei komplette Umläufe der beiden Fahrzyklen RSV und MGV, wodurch eine Gegenüberstellung des Potenzials der Start-Stopp-Betriebsweise für einen Kalt- und Warmstart des Motors ermöglicht wird. Die Aufwärmphase der Abgasnachbehandlungsanlage beginnt bei einer Umgebungstemperatur von 293 K.

Der Vergleich der Katalysatortemperaturverläufe für RSV und MGV zeigt deutliche Unterschiede für die beiden Fahrzyklen während der Aufwärmphase. Die light-off Temperatur von 473 K wird am schnellsten mit dem RSV-Fahrprofil ohne Start-Stopp-Betriebsweise erreicht, am längsten wird dafür ebenfalls bei dem RSV-Zyklus jedoch mit Start-Stopp-Betriebsweise benötigt. Auch für das MGV-Fahrprofil ist eine Verlängerung der Aufwärmphase mit aktiver Start-Stopp-Funktion erkennbar. Die kürzere Aufwärmphase während des RSV ohne Start-Stopp kann mit dem höheren innerstädtischen Anteil vor allem zu Beginn des Fahrprofils erklärt werden, die wiederholten Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit vermehrt auftretenden höheren Lastpunkten führen zu einer vergleichsweise höheren Abgastemperatur. Der MGV-Zyklus weist hingegen eine Bergabfahrt zu Beginn des Fahrprofils auf, wodurch sich die Aufwärmphase verlängert. Der geringere Unterschied zwischen Start-Stopp und normaler Betriebsweise, während der Aufwärmphase für das MGV-Fahrprofil, ist auf die niedrigere Anzahl an Haltestellenstopps zurückzuführen. Für beide betrachteten Fahrprofile gilt jedoch, dass bis zum Erreichen der light-off Temperatur bereits fast die Hälfte des Profils gefahren wurde.

Die Katalysatoren erreichen bei dem MGV-Fahrprofil die höchsten Temperaturen, aufgrund der wiederholten Bergauffahrten. Die einzelnen Komponenten der Abgasnachbehandlungsanlage werden während der Bergabfahrten jedoch stark abgekühlt und die Temperatur kann gerade noch über light-off gehalten werden. Die Katalysatortemperaturen während des RSV-Zyklus weisen geringere Schwankungen auf und die Temperatur kann trotz der vermehrten verkehrsbedingten Stopps im innerstädtischen Bereich auf einem höheren Niveau gehalten werden.

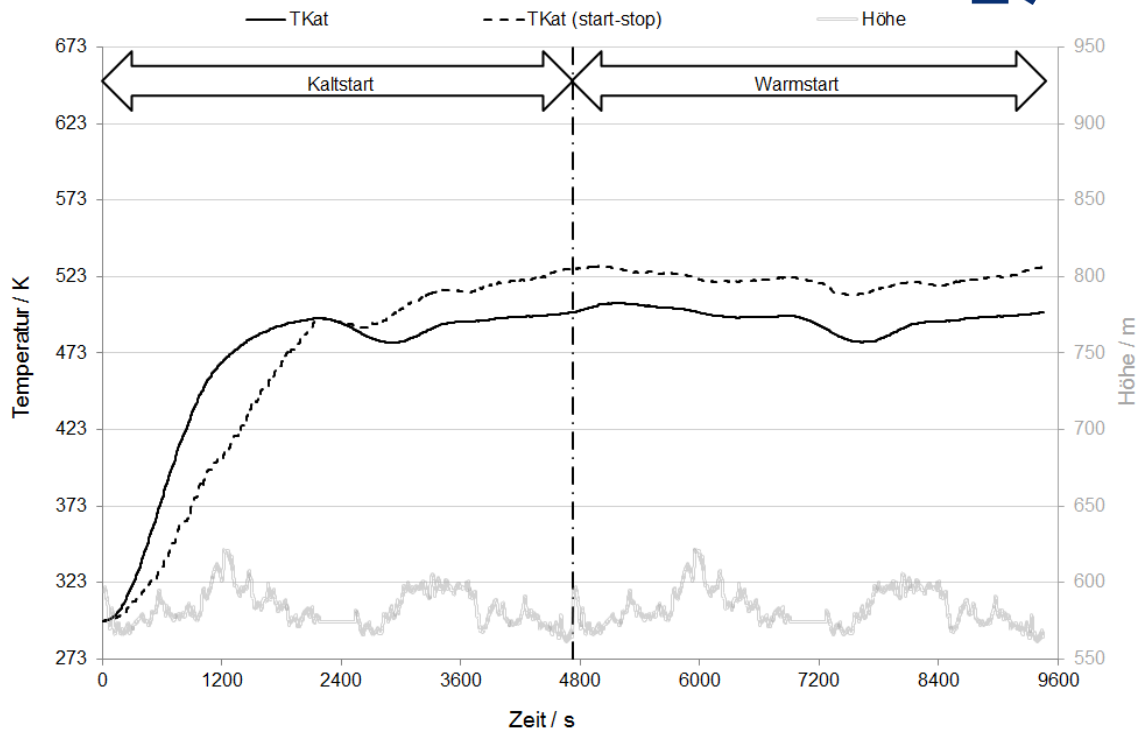


Abbildung 9: Gemittelter Temperaturverlauf des SCR-Katalysators mit beziehungsweise ohne Start-Stopp-Funktion und dazugehörigem Höhenprofil für den RSV-Zyklus

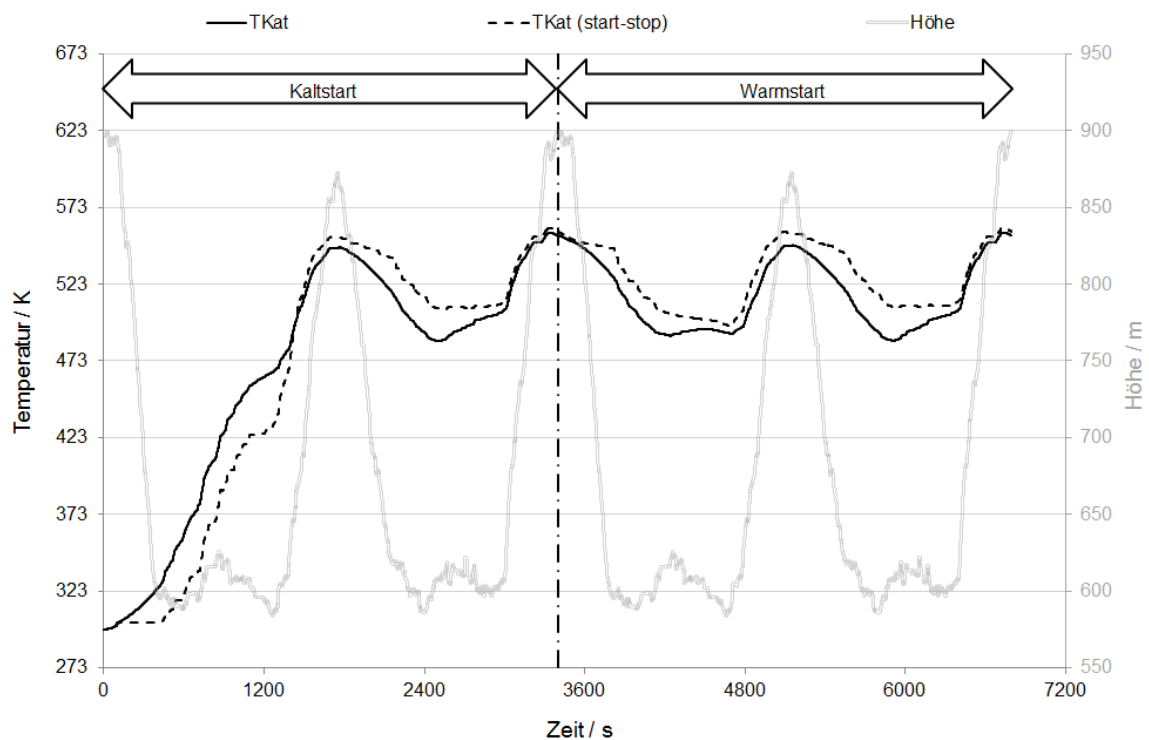


Abbildung 10: Gemittelter Temperaturverlauf des SCR-Katalysators mit beziehungsweise ohne Start-Stopp-Funktion und dazugehörigem Höhenprofil für den MGV-Zyklus

Das verzögerte Aufheizen der Katalysatoren bei der Start-Stopp-Betriebsweise unabhängig vom Fahrprofil kann darauf zurückgeführt werden, dass das relativ kühle Leerlaufabgas (423 K) der Abgasanlage Wärme zuführt, solange diese eine niedrigere Temperatur aufweist. Die Temperaturänderungen der Katalysatoren während eines Stopps mit Start-Stopp-Funktion werden aufgrund des fehlenden Abgasmassenstroms ausschließlich infolge von Wärmeverlusten an die Umgebung hervorgerufen. Zusammengefasst ergibt sich daraus, dass sich die Start-Stopp-Funktion kontraproduktiv auf die Aufwärmphase der Katalysatoren auswirkt. Sobald jedoch die einzelnen Komponenten der Abgasnachbehandlungsanlage eine Temperatur größer der des Abgases im Leerlauf erreicht haben, beeinflusst die Start-Stopp-Funktion die Temperaturen der Katalysatoren positiv. Das kalte Abgas, welches ohne Start-Stopp-Betrieb, während Haltestellen- oder verkehrsbedingter Stopps, durch die Abgasnachbehandlungsanlage strömt, kühlt die Katalysatoren aus und stellt somit ein Risiko für das Absinken der Katalysatortemperatur unter light-off während des Betriebs dar.

### Zusammenfassung

Ziel dieser Forschungsaktivität war die Simulation des Temperaturverlaufs über die gesamte Abgasnachbehandlungsanlage während zwei realer Fahrzyklen von Stadtbussen mittels eines experimentell validierten numerischen Modells und die Untersuchung des Potenzials der Start-Stopp-Betriebsweise auf den Thermohaushalt der Katalysatoren. Das Berechnungsmodell greift für die Simulation auf experimentell ermittelte Kennfelder zurück, welche das spezifische Verhalten des Motors beschreiben. Zusätzlich wurden zwei Fahrprofile, einerseits repräsentativ für den regulären Stadtverkehr und andererseits eine regionaltypische Linie mit großem Mittelgebirgsanteil, mittels GPS-Datenlogger aufgezeichnet und als Eingangsparameter für das Modell verwendet.

Das Erreichen der light-off Temperatur des SCR-Katalysators nimmt grundsätzlich für beide Fahrzyklen sehr lange in Anspruch. Während dieser Phase tritt ein Großteil der bei der Verbrennung entstandenen Emissionen unbehandelt in die Atmosphäre aus. Des Weiteren wirkt sich der Start-Stopp-Betrieb für beide Fahrprofile negativ auf die Aufwärmphase der Katalysatoren aus, da das relativ kühle Abgas während Leerlaufphasen vom Motor, aufgrund von Haltestellen- oder verkehrsbedingten Stopps, die Katalysatoren anfänglich weiter aufheizen würde. Nachdem die light-off Temperatur erreicht wird, wirkt sich das Abstellen des Motors während Stillstandzeiten positiv auf den Wärmehaushalt aus, da kein kühles Abgas die Katalysatoren durchströmt.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass sich die Katalysatortemperatur der beiden betrachteten Fahrprofile während Stillstandzeiten beziehungsweise Bergabfahrten verringert, jedoch eine angenommene light-off Temperatur von 473 K nach der Aufwärmphase nicht mehr unterschreitet. Bedingt durch die unterschiedlichen Fahrprofile wird die minimale Katalysatortemperatur für den RSV in der Endhaltestelle erreicht, während für den MGV-Zyklus (ohne Endhaltestellenstopp) die minimale Temperatur in der bergab Phase auftritt. Schlussfolgernd besteht das ungünstigste Szenario demnach aus einer Kombination von einer Stillstandphase in der Endhaltestelle und einer darauffolgenden Bergabfahrt. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse lässt sich die Handlungsempfehlung ableiten, dass für Fahrprofile mit einem großen Mittelgebirgsanteil ein Endhaltestellenstopp vor einer Bergabfahrt zu vermeiden ist und unabhängig vom Fahrprofil die Start-Stopp-Funktion nach Erreichen der light-off Temperatur durchaus sinnvoll für den Thermohaushalt der Abgasanlage ist.

## Literaturverzeichnis

Brück, R./Hirth, P./Hu, B./Schorn, Ch. (2017): Neue Katalysatorträger-Innovation für RDE- und SULEV-30-Grenzwerte. In: Motortechnische Zeitschrift 78, 18-26.

Badur, J./Köhler, F./Schmidt, H. (2016): Real Driving Emissions (RDE) – Stand der Diskussion und Umsetzung in die Praxis. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 796.

Merker, G. (2006): Verbrennungsmotoren. Wiesbaden: B. G. Teubner, ISBN 10 3-8351-0080-7.

Laible, T. et al. (2015): Light-off/out-Unterstützung beim Katalysator von Dieselmotoren. In: Motortechnische Zeitschrift 11, ISSN 0024-8525-10824.

Goebel, U. et al. (2008): Diesel NO<sub>x</sub>-Abgasnachbehandlungssysteme für Nordamerika. In: VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 12, Nr. 672.

Möltner, L./Hohensinner M./Schallhart V. (2016): Experimental and Numerical Analysis of Low Temperature NO<sub>x</sub> – Conversion in Urban Busses. In: SAE Technical Paper 2016-01-8076, doi:10.4271/2016-01-8076.

Rampeltshammer, M. et al. (2005): Benzin-Direkt-Einspritzer und Starter/Generator – Praktische Erfahrungen und Messergebnisse mit einem Versuchsfahrzeug. Tagung Hybridantrieb – die Zukunft des Automobilantriebs?, June 16-17, Berlin, Germany.